

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ КРАЕВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ В ОБЛУЧЕННОМ ФЕРРОМАГНЕТИКЕ

В.В. Малашенко<sup>1)</sup>, Т.И. Малашенко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Донецкий физико-технический институт им. Галкина,  
ул. Р. Люксембург, 72, Донецк, 83114, malashenko@fti.dn.ua

<sup>2)</sup>Донецкий национальный технический университет, ул. Артема, 58, Донецк, 83001

Теоретически исследовано взаимодействие движущейся краевой дислокации с дислокационными петлями в ферромагнетиках с гигантской магнитострикцией. Получены условия существования эффекта сухого трения в облученных ферромагнитных кристаллах. Выполнены численные оценки вклада данного механизма диссипации в величину предела текучести ферромагнетика. Показано, что при высокой концентрации петель этот механизм может привести к повышению предела текучести на десятки процентов.

### Введение

При облучении кристаллов значительно возрастает количество радиационных дефектов структуры, в частности точечных дефектов и дислокационных петель. Взаимодействуя с движущимися дислокациями, они оказывают существенное влияние на процесс пластической деформации и формирование механических свойств кристалла. Потенциальные барьеры, созданные такими дефектами, движущаяся дислокация может преодолевать двумя путями в зависимости от скорости своего движения. Медленно движущиеся дислокации останавливаются перед такими барьерами и могут преодолеть их с помощью термических флуктуаций. Возрастание скорости дислокаций приводит к тому, что их кинетическая энергия превосходит высоту энергетических барьеров, создавая условия для динамического преодоления препятствий без участия термических флуктуаций. Это так называемая динамическая область скоростей, нижняя граница которой определяется неравенством  $v \geq 10^{-2}c$ , где  $c$  – скорость распространения поперечных звуковых волн в кристалле [1]. Скорость пластической деформации  $\dot{\epsilon}_d$ , как известно, связана с плотностью подвижных дислокаций  $\rho_d$  и средней скоростью движения дислокаций  $v$  соотношением  $\dot{\epsilon}_d = b\rho_d v$ . Торможение дислокаций в этой области в значительной степени определяется перекачкой энергии от дислокации к различным элементарным возбуждениям в кристалле, однако при высокой концентрации структурных дефектов решетки динамическое взаимодействие дислокации с этими дефектами становится весьма существенным и оказывает значительное влияние на ее подвижность, а также свойства кристаллов, обусловленные дислокационным движением. Основанные на этом взаимодействии механизмы диссипации являются температурно-независимыми, поэтому их вклад в динамическое торможение возрастает с понижением температуры, когда фононные и магнонные механизмы “вымораживаются”, теряя свою эффективность. При высокой концентрации дефектов их влияние на динамику дислокаций может быть существенным и в области комнатных температур.

В работе [2] показано, что в облученном деформируемом материале может наблюдаться

эффект резкого возрастания доли дислокаций, преодолевающих препятствия в динамическом режиме. Кроме того, облучение приводит к значительному возрастанию концентрации структурных дефектов, при этом интенсивность развития микроструктуры зависит от вида облучения и его характеристик (сечений ядерных реакций, зарядовых и энергетических спектров и т.д.) [3]. Эти характеристики определяют интенсивность образования вакансий и междоузельных атомов – пар Френкеля, различных примесей, дислокационных петель. Отметим, что дислокационные петли могут образовываться и при различных видах обработки металлов (ковке, штамповке), а также в результате релаксации напряжений вблизи наводключений [4], но наиболее высоких значений концентрация петель достигает при радиационном облучении. Теоретическому исследованию динамического торможения движущихся дислокаций дислокационными петлями посвящены работы [5-7]. В работе [6] анализировалось возникновение эффекта сухого трения (независимость силы торможения от скорости дислокации) в кристаллах, содержащих неподвижные дислокационные петли, однако возникновение эффекта сухого трения в облученных ферромагнетиках ранее не изучалось. Такое исследование выполнено в настоящей работе.

### Основная часть

Пусть бесконечная краевая дислокация совершает скольжение под действием постоянного внешнего напряжения  $\sigma_0$  в положительном направлении оси  $OX$  с постоянной скоростью  $v$  в ферромагнитном кристалле с магнитной анизотропией типа “легкая ось”. Ось легкой намагниченности и магнитного поля совпадает с положительным направлением этой оси. Линия дислокации параллельна оси  $OZ$ , вектор Бюргерса дислокации параллелен оси  $OX$ . Плоскость скольжения дислокации совпадает с плоскостью  $XOZ$ , а ее положение определяется функцией:

$$X(y=0, z, t) = vt + w(y=0, z, t) \quad (1)$$

Плоскости дислокационных петель параллельны плоскости скольжения дислокации, а их центры распределены в кристалле случайным образом. Рассмотрим случай, когда все дислокационные петли являются призматическими. Для простоты все петли будем считать одинаковыми, то есть

имеющими одинаковые радиусы равные  $a$  и одинаковые векторы Бюргерса  $\mathbf{b}_0 = (0, -b_0, 0)$  параллельные оси ОУ. Уравнение движения дислокации может быть представлено в следующем виде:

$$m \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \right\} = b \left[ \sigma_0 + \sigma_{xy}^d + \sigma_{xy}^L \right] - B \frac{\partial X}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{xy}^d$  – компонента тензора напряжений, создаваемых точечными дефектами на линии дислокации,  $\sigma_{xy}^L$  – компонента тензора напряжений, создаваемых на этой линии призматическими петлями,  $B$  – константа демпфирования, обусловленная фононными, магнонными или электронными механизмами диссипации,  $m$  – масса единицы длины дислокации,  $c$  – скорость распространения в кристалле поперечных звуковых волн. В данном уравнении движения мы пренебрегли влиянием рельефа Пайерлса на движение дислокаций, что справедливо, в частности, для металлов и щелочно-галогидных кристаллов. Исследуемый механизм диссипации заключается в необратимом переходе кинетической энергии движения дислокации как целого в энергию поперечных колебаний дислокационных элементов относительно “центра масс” дислокации.

Выражение для силы торможения дислокации точечными дефектами имеет вид:

$$F_d = \frac{n_L b^2}{8\pi^2 m} \int d^3 p |p_x| |\sigma_{xy}|^2 \delta(p_x^2 v^2 - \omega^2(p_z)), \quad (3)$$

где интегрирование производится по всему импульсному пространству,  $n_L$  – объемная концентрация дислокационных петель,  $\delta(p_x^2 v^2 - \omega^2(p_z))$  – это  $\delta$ -функция Дирака,  $\omega(p_z) = \sqrt{\Delta^2 + c^2 p_z^2}$  – закон дисперсии дислокационных колебаний.

Вклад магнитоупругого взаимодействия в формирование спектральной щели, согласно [7], определяется выражением:

$$\Delta_M^2 = \frac{B_M^2 b^2 \omega_M}{16\pi m c_s^2} \ln \frac{\theta_c}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

где  $B_M$  – константа магнитоупругого взаимодействия;  $b$  – модуль вектора Бюргерса;  $m$  – масса единицы длины дислокации;  $\omega_M = g M_0$ ;  $g$  – гиромагнитное отношение;  $M_0$  – намагниченность,  $\theta_c$  – температура Кюри. Параметры  $\varepsilon_0$  и  $c_s$  определяют спектр магнонов в ферромагнетике с анизотропией типа легкая ось, когда магнитное поле направлено вдоль оси анизотропии:  $\varepsilon(k) = \varepsilon_0 + c_s^2 k^2$  ( $k$  – волновой вектор).

В случае кристаллов с гигантской магнитострикцией вклад магнитоупругого взаимодействия в формирование спектральной щели оказывается

самым существенным, т.е.  $\Delta = \Delta_M$ , поэтому в кристаллах такого типа и величина щели, и величина силы торможения дислокации дислокационными петлями зависит от магнитных характеристик конкретного вещества. Например, для гадолиния, согласно данным работы [7], вклад магнитоупругого взаимодействия по порядку величины составляет  $\Delta_M = 10^{12} \text{ s}^{-1}$ , то есть в этом металле он является доминирующим.

Воспользовавшись результатами работ [5, 6], получим, что в области скоростей  $v < v_L$ , где величина характерной скорости  $v_L$  определяется выражением  $v_L = a\Delta$ , сила динамического торможения движущейся краевой дислокации дислокационными петлями имеет характер сухого трения, т.е. не зависит от скорости дислокационного скольжения. Поскольку для гадолиния вектор Бюргерса составляет  $b = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ , получим для величины характерной скорости значение  $v_L = 360 \text{ m/s}$ , т.е. в данном случае сухое трение должно иметь место практически во всем диапазоне динамических скоростей, границы которого определяются неравенствами  $c \gg v \geq 10^{-2} c$ , где  $c$  – скорость звука в кристалле.

Воспользовавшись результатами работы [6], получим выражение для силы торможения движущейся краевой дислокации неподвижными дислокационными петлями в ферромагнетиках с гигантской магнитострикцией:

$$F_L = \frac{\pi n_L \mu b^2 a c}{3(1-\gamma)^2 \Delta_M} \quad (5)$$

Здесь  $\mu$  – модуль сдвига,  $\gamma$  – коэффициент Пуассона. Из полученного выражения следует, что сила торможения в исследуемом случае действительно не зависит от скорости дислокационного скольжения, т.е. имеет место сухое трение дислокаций.

Проведенный анализ позволяет оценить вклад рассматриваемого механизма диссипации в величину предела текучести. Выполним численную оценку этого вклада для гадолиния ( $\mu = 2,2 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$ ,  $\gamma = 0,25$ ,  $c = 3 \cdot 10^3 \text{ m/s}$ ). Значение концентрации петель и их размеров возьмем из работы [8], посвященной изучению структуры облученных материалов. Для  $n_L = 1,7 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$  и  $a = 5 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  (доза 4 фРа) получим  $\tau_L = 41 \text{ MPa}$ . Поскольку предел текучести гадолиния равен 182 МПа, его увеличение за счет рассмотренного механизма составляет 22 %.

В облученных кристаллах резко возрастает количество точечных радиационных дефектов. Их коллективное взаимодействие с дислокацией также вносит вклад в формирование спектральной щели, величина которого определяется следующим выражением:

$$\Delta_{def} = \frac{c}{b} \left( n_{0d} \chi^2 \right)^{1/3} \approx \frac{c}{l_d}, \quad (6)$$

где  $l_d$  – среднее расстояние между точечными дефектами, случайным образом распределенными в объеме кристалла,  $n_{0d}$  – безразмерная концентрация этих дефектов,  $\chi$  – параметр несоответствия дефекта.

При высокой концентрации точечных дефектов вклад торможения дислокации петлями в величину предела текучести облученного материала равен:

$$\tau_L = \frac{n_L \mu b_0^2 a}{(1 - \gamma)^2 (n_{0d} \chi^2)^{1/3}} \quad (7)$$

Как следует из полученного выражения, этот вклад зависит не только от концентрации петель, но и от концентрации точечных дефектов: увеличение концентрации этих дефектов приводит к увеличению размеров спектральной щели, а, следовательно, к уменьшению силы торможения дислокации петлями. Полученная формула справедлива для высоких значений концентрации точечных дефектов, поскольку только в этом случае возможно коллективное динамическое воздействие дефектов на дислокацию и перенормировка ее колебательного спектра.

Выполним численные оценки, воспользовавшись данными работы [8] для облученной стали 08X18H10T. Для значений  $n_L = 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ,  $a = 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ,  $\mu = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $b = 2,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\chi = 10^{-1}$ ,  $n_{0d} = 10^{-3}$  получим  $\tau_L = 50 \text{ МПа}$ , что составляет 20 % предела текучести исходного необлученного образца.

## Заключение

Интерес к исследованию движения дислокаций в динамической области в последние годы заметно возрос, что связано, с одной стороны, с важностью дислокационной динамики для понимания процессов, происходящих в кристаллах в области низких температур, при высокоскоростном растяжении либо под действием ударных нагрузок, в частности, создаваемых коротковолновым лазерным излучением огромной мощности, с другой – с интенсивным применением в этой области метода молекулярной динамики. Динамическое поведение дислокаций влияет также на формирование свойств металлов при

использовании нового перспективного метода сварки – сварки взрывом.

Как известно, микроэлектромеханические системы (MEMS), объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические элементы, обычно изготавливают на основе кремния. Однако в 2011 году группой исследователей был получен сплав на основе железа и кобальта, обладающий гигантской магнитострикцией, который может стать основой для создания датчиков и микромеханических устройств нового поколения, контролируемых магнитным полем. Поскольку используемые в микросистемотехнике материалы перестали быть чисто электронными и широко используются как конструкционные, большое значение приобретают их механические свойства, которые в значительной степени определяются движением дислокаций и их взаимодействием с различными структурными дефектами кристалла. В свою очередь наличие гигантской магнитострикции оказывает влияние на взаимодействие дислокаций с другими дефектами структуры, а, следовательно, и на механические свойства кристаллов.

Полученные результаты могут быть полезны при анализе пластических свойств металлов и сплавов, которые обладают гигантской магнитострикцией.

## Список литературы

1. Альшиц В.И., Инденбом В.Л. // УФН. 1975. № 1. С. 3-29.
2. Камышанченко Н.В., Красильников В.В., Неклюдов Н.В., Пархоменко А.А. // ФТТ. 1998. Т. 40. № 9. С. 1631-1634.
3. Слезов В.В., Субботин А.В., Осмаев О.А. // ФТТ. 2005. Т. 47. № 3. С. 463-468.
4. Chaldyshev V. V., Kolesnikova A. L., Bert N. A., Romanov A.E. // Appl. Phys. 2005. Vol. 97. 024309 (10 pages).
5. Malashenko V.V. // Physica B: Phys. Cond. Mat. 2009. Vol. 404. P. 3890-3893.
6. Малашенко В.В. // ФТТ. 2011. Т. 53. № 11. С. 2204-2208.
7. Малашенко В.В. // ПЖТФ. 2012. Т. 38. № 19. С. 61-65.
8. Неустроев В.С., Дворецкий В.Г., Островский З.Е., Шамардин В.К., Шиманский Г.А. // ВАНТ. 2003. № 3. С. 73-78.

## SPECIFICITY OF EDGE DISLOCATION DYNAMICS IN IRRADIATED FERROMAGNET

V.V. Malashenko<sup>1)</sup>, T.I. Malashenko<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin,  
R. Luxembourg str. 72, Donetsk, 83114, malashenko@fti.dn.ua

<sup>2)</sup>Donetsk National Technical University, Artem str., 58, Donetsk, 83000

The interaction of a moving edge dislocation with dislocation loops in ferromagnet with giant magnetostriction has been theoretically studied. The conditions of existence of the dry friction in irradiated ferromagnet has been obtained. Numerical estimates of the dissipation mechanism contribution in the value of the yield point of a ferromagnet has been made. It is shown that at high concentration of loops this mechanism can lead to an increase in yield point by tens of percents.